

Tratamiento analógico de señales

J. Ibáñez

13.1. Introducción

En un MEB, el acceso a la información contenida en la señal se realiza a través de la pantalla de un tubo de rayos catódicos, cuyo barrido está sincronizado con el que efectúa el haz electrónico sobre la muestra. Ello da lugar a una doble correspondencia: una geométrica punto a punto, entre muestra y pantalla, y otra entre el brillo en cada punto de esta última y la señal emitida por el punto equivalente de la muestra. Normalmente, la magnitud de la señal a la salida del detector es insuficiente para modular por sí misma el brillo en la pantalla, por lo que es preciso amplificarla. Cuando esta amplificación es de tipo lineal, la imagen final tendrá el contraste propio que posee la señal a la salida del detector, también denominado contraste natural. Ahora bien, pueden presentarse casos en los que sea difícil de visualizar por el observador la imagen con contraste natural, debido a las limitaciones propias de ojo humano a la hora de discriminar niveles próximos de gris. Es un hecho conocido que el ojo humano distingue un número limitado de tonos de grises diferentes, dentro de la escala que va del blanco al negro puros, que oscila, aproximadamente, entre 12 y 20, dependiendo de que la observación se haga sobre pantalla o fotografía, respectivamente. Se deduce, por tanto, que una imagen contendrá el máximo de información visual, cuando el intervalo dinámico de la señal sea tal que cubra la escala completa de grises en la pantalla. Con el fin de aumentar la información contenida en la imagen, muchos MEB disponen de distintos tratamientos de la señal que introducen modificaciones en el intervalo dinámico de la señal y, ó, en el contraste natural. A este respecto, es preciso destacar que estos tratamientos se limitan a transformar la señal previamente adquirida con el fin de facilitar su visualización, y no añaden ninguna información que no esté contenida en aquélla. En este capítulo se describirán los métodos más usuales de modificación electrónica del contraste, en base a transformaciones analógicas en tiempo real de la señal, dejando para otro capítulo posterior los procesos de almacenamiento y tratamiento digital de imágenes.

De entre la gran variedad de tratamientos de señales posibles, únicamente se van a considerar aquellos que suelen estar disponibles en los MEB convencionales, como son: inversión de la señal, amplificación diferencial, amplificación no lineal (gamma), derivación de la señal, modulación en Y, y la combinación de tratamientos. La discusión de cada uno de ellos estará orientada al usuario del MEB, por lo que se hará especial hincapié en el origen conceptual de los tratamientos y en sus aplicaciones, dejando de lado los aspectos electrónicos correspondientes.

13.2. Inversión de la señal

Mediante este proceso se invierte la polaridad de la señal, pasando de una imagen con contraste natural (imagen positiva), a otra que es la invertida de la anterior (imagen negativa, o complementaria). Para ello la señal S , se resta de un nivel fijo, que corresponde al que da lugar a la saturación de la pantalla ($S_{\text{máx}}$), resultando una señal final S' , que viene expresada por:

$$S' = S_{\text{máx}} - S$$

Este tratamiento de la señal no aumenta el contraste de la imagen, pero puede resultar útil para comparar imágenes de señales complementarias, como, por ejemplo, las producidas por las señales de corriente absorbida y de electrones emitidos. También se puede utilizar para recuperar la sensación del relieve topográfico original en las réplicas, y para obtener diapositivas a partir de películas fotográficas normales (fig. 13.1).

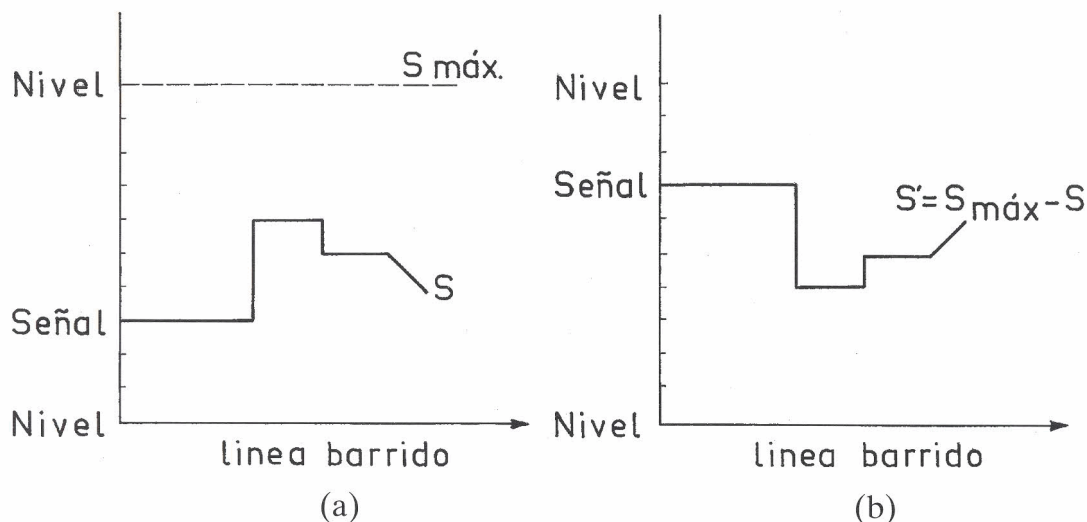


Fig. 13.1. Inversión de la señal; a) señal con contraste natural, y b) señal con contraste invertido.

13.3. Supresión de la componente continua. Amplificación diferencial

Este tratamiento consiste en restar a la señal S , procedente del detector, una cierta cantidad fija S_0 y amplificar linealmente un factor α la señal remanente, resultando una señal (fig. 13.2):

$$S' = \alpha(S - S_0)$$

De esta forma, con la elección adecuada del valor de S_0 , se puede eliminar la componente continua de la señal, que normalmente carece de interés al no contribuir al contraste (fig. 13.2b). Además, cuando el parámetro α sea mayor que la unidad, la componente alterna de la señal quedará amplificadas, produciendo una expansión en el número de niveles de gris, y el consiguiente aumento en el contraste de la imagen en pantalla (fig. 13.2c). Por tanto, la principal misión de este tratamiento es conseguir que la imagen ocupe la totalidad del intervalo dinámico de gris de la pantalla. Ahora bien, la elección inadecuada de S_0 y α puede dar lugar a la pérdida de parte de la información contenida en la componente alterna de la señal. En primer lugar, existe una limitación en el valor de la componente continua, que si se sobrepasa dará lugar a la desaparición de aquellos picos de la componente alterna situados a un nivel inferior a S_0 . Además, en el posterior proceso de amplificación, puede llegar a producirse la eliminación de los niveles más altos de la componente alterna de la señal, por saturación de la pantalla, a partir de un cierto valor de α (fig. 13.2d). Otro factor a tener en cuenta es el aumento de ruido que se produce con este tratamiento. Comparando la figura 13.2a con la 13.2c se observa que, paralelamente al aumento de contraste se produce el correspondiente aumento del ruido que porta la señal, que se traduce en granulosidades de la imagen y, en definitiva, en una pérdida de calidad de la misma. Por tanto, será preciso partir de una señal lo más limpia posible de ruido para conseguir una imagen final aceptable.

Este tratamiento suele ir incorporado en los MEB convencionales en forma de dos mandos denominados brillo y contraste. El primero de ellos hace variar el nivel de continua, S_0 , que se resta a la señal, y el segundo actúa sobre la amplificación de la señal a través del voltaje del primer dinodo del fotomultiplicador (en el caso de los detectores que hacen uso de él).

13.4. Amplificación no lineal (gamma)

En algunos casos, y una vez conseguido con la amplificación diferencial que el contraste de la imagen ocupe todo el intervalo dinámico de la pantalla, puede ocurrir que algunas morfologías de interés resulten poco visibles por falta de contraste. En este caso una mayor amplificación lineal hará que estas morfologías queden más resaltadas, pero al actuar sobre el resto del espectro, se producirá la saturación del brillo de la pantalla para los niveles más altos de la señal. No obstante, cuando los niveles de grises que definen las morfologías de interés están próximos a los extremos

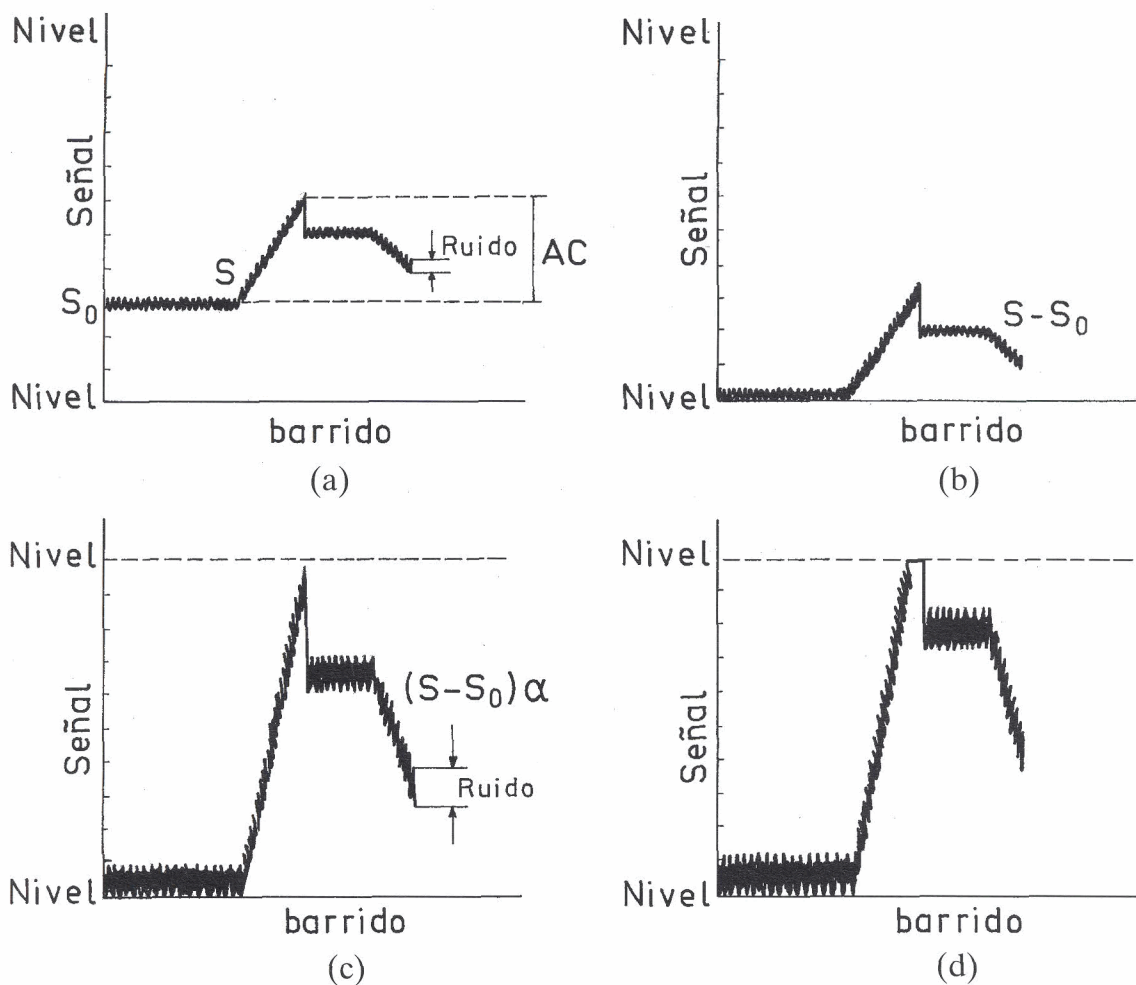


Fig. 13.2. Efecto de la supresión de la componente continua y posterior amplificación; a) señal con contraste natural; b) señal resultante de restar la componente continua; c) amplificación correcta, y d) amplificación incorrecta por excesiva.

blanco o negro puros, es posible llevar a cabo la amplificación no lineal o proceso gamma. Mediante este proceso se consigue la expansión local del número de niveles de gris y, por tanto, del contraste, en uno de los extremos de intervalo dinámico, a expensas de la consiguiente contracción en el extremo opuesto. De esta forma, si S es la señal de partida, el proceso gamma la transforma en otra, S' , tal que:

$$S' = S^{1/\gamma}$$

donde el parámetro γ puede tomar valores superiores o inferiores a la unidad. Para $\gamma < 1$, se produce una expansión selectiva en el número de niveles de gris situados cerca del blanco, y para $\gamma > 1$ la expansión se localiza en los tonos próximos al extremo negro (fig. 13.3).

13.5. Derivación de la señal

La señal de salida del detector puede ser sometida a un proceso de derivación analógico, que introduce una serie de modificaciones en la imagen muy útiles en determinados casos. Para comprender estas modificaciones, resulta conveniente considerar la imagen en pantalla como la suma de sucesivas líneas de barrido horizontales, en cada una de las cuales la señal correspondiente viene representada por la siguiente función:

$$S_m = f_m(x)$$

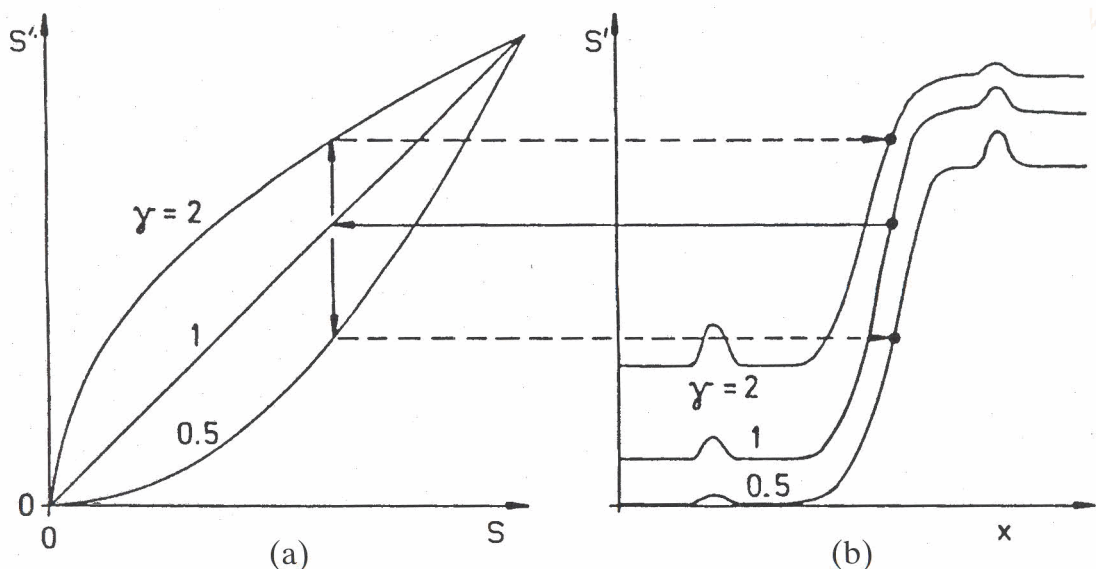


Fig. 13.3. Amplificación gamma; a) características de la amplificación γ , y b) efecto de la amplificación γ a lo largo de una línea de barrido.

donde S_m es el valor que toma la señal de entrada al tubo de rayos catódicos en la coordenada x , situada en la línea de barrido m . La función S_m admite un desarrollo en serie de Fourier, sin más que considerar que su período coincide con la anchura de la pantalla de observación, L . Así:

$$S_m = A_0^m/2 + \Sigma[A_n^m \cos 2\pi nx/L + B_n^m \sen 2\pi nx/L]$$

esta función puede trasladarse al dominio de frecuencias espaciales, teniendo en cuenta que el barrido horizontal se realiza a una velocidad constante v_o . Por tanto, como $x = v_o t$ y $L = v_o T$

$$S_m = f_m(t) = A_0^m/2 + \Sigma[A_n^m \cos n\omega t + B_n^m \sen n\omega t] \quad [13.1]$$

con la frecuencia espacial $\omega = 2\pi/T$, y los coeficientes A_0^m , A_n^m y B_n^m definidos en la forma habitual:

$$\begin{aligned} A_n^m &= 2/T \int_0^T f_m(t) \cos n\omega t \, dt \\ B_n^m &= 2/T \int_0^T f_m(t) \sen n\omega t \, dt \\ A_0^m/2 &= f_m(t) \end{aligned}$$

la derivada de la función $f_m(t)$ adoptará la forma

$$S'_m = df_m(t)/dt = \Sigma[A_n^m n\omega \cos(n\omega t + \pi/2) + B_n^m n\omega \sen(n\omega t + \pi/2)] \quad [13.2]$$

Esta derivación se realiza acoplando la señal a un amplificador operacional por medio de un condensador. La imagen final que se obtiene mediante este proceso se diferencia de la primitiva en lo siguiente:

i) Como puede verse a partir de las expresiones [13.1] y [13.2], los valores medios de S_m y S'_m son $A_0^m/2$ y cero, respectivamente; por tanto, si al nivel negro de la pantalla le corresponde el nivel cero de señal, los valores negativos de S'_m no serán visibles al estar situados todos ellos en el mismo nivel negro. Para visualizar los niveles negativos de S'_m existen dos opciones: o bien llevar a la pantalla el valor absoluto de la señal derivada, o sumar a ésta una señal fija situada justo en la mitad del intervalo dinámico de la escala de grises de la pantalla. Cada una de estas dos posibilidades, dará una imagen diferente, y la elección de una u otra dependerá del tipo de morfologías que se deseen resaltar.

ii) A la vista de la ecuación [13.2], se observa que los términos del desarrollo en serie de S'_m sufren una amplificación que crece conforme lo hace la frecuencia espacial $n\omega$, que acentúa las variaciones rápidas de la señal en relación a las lentas. Ello explica además la desaparición del término $A_0^m/2$, que corresponde a $n\omega=0$, ya comentado en i).

El hecho de que la derivación se realice individualmente para cada una de las funciones correspondientes a las diferentes líneas de barrido horizontal, introduce importantes distorsiones, normalmente no deseadas, en la imagen. Así, un objeto orientado perpendicularmente al barrido horizontal, dará lugar a variaciones rápidas de contraste en sus bordes, que quedarán resaltados en el proceso de derivación. Por el contrario, cuando el objeto está orientado paralelamente a la línea de barrido verá disminuida drásticamente su visibilidad. Por ejemplo, imaginemos que la señal correspondiente a la línea de barrido m es igual a una cantidad constante ($S_m=a$), y que la señal de la línea siguiente $m+1$, está definida por otra constante de valor muy diferente al anterior ($S_{m+1}=b$). En la imagen primitiva se observarían dos líneas sucesivas muy contrastadas, mientras que en la derivada no se apreciará ninguna diferencia de contraste al ser idénticas ambas señales derivadas ($S'_m=S'_{m+1}=0$). Esta anisotropía se puede compensar realizando dos barridos ortogonales consecutivos, y tomar como imagen final la resultante de la superposición de las imágenes correspondientes a cada barrido.

Otra consideración a tener en cuenta se refiere a la relación señal-ruido en la imagen derivada. Por su propia naturaleza, el ruido es portador de componentes de alta frecuencia, razón por la que en el proceso de derivación se verá especialmente favorecida su amplificación, y dará lugar a un deterioro de la relación señal-ruido. En el resto de los tratamientos estudiados la relación señal-ruido permanece prácticamente inalterada. Por tanto, será en el proceso de derivación donde la limpieza de la señal original desempeñará un papel más crítico.

iii) De lo dicho hasta ahora se deduce que el proceso de derivación acentúa el contorno de los objetos, que es precisamente donde reside el atractivo de esta técnica. Ahora bien, las fases de las funciones derivada y primitiva difieren en un factor $\pi/2$, hecho que se traduce en desplazamientos relativos entre ambas imágenes, que, además, son distintos en cada punto. La magnitud del desplazamiento en un punto determinado, depende de la forma de la función S_m en las proximidades del mismo, y disminuye conforme aumenta la velocidad de variación de S_m en dichas proximidades (o lo que es lo mismo, su pendiente), ya que en ese caso aumentará el peso de los términos de alta frecuencia y menor longitud de onda, que corresponde a menores desplazamientos espaciales. Ello hace que, en general, los distintos puntos que definen el contorno de un objeto sufran desplazamientos diferentes, que conducen a una variación de su forma y dimensión en la imagen derivada.

A modo de resumen, la derivación de la señal produce un aumento local de contraste, que es proporcional al incremento de la variación del contraste en la imagen original. Por tanto, puede aplicarse en todos aquellos casos en los que sea necesario acentuar bordes de objetos y estructuras, como sucede en los diagramas de canalización de electrones, en la identificación de partículas, límites de grano, etc. Como inconvenientes caben señalar, además de la pérdida de la sensación topográfica y del deterioro de la relación señal-ruido, el carácter anisótropo, y la tendencia a modificar el contorno de los objetos. Estos dos últimos problemas son difíciles de solucionar dentro del contexto analógico, por lo que en los análisis cuantitativos es más conveniente recurrir al proceso conocido genéricamente como filtro, en el tratamiento digital de imágenes. Mediante este último pueden efectuarse modificaciones sobre la imagen similares a los de derivación analógica, y se verá con cierto detalle en un capítulo posterior.

13.6. Modulación en Y

Hasta ahora, todos los tratamientos que se han considerado actúan sobre el contraste natural, pero sin alterar la correspondencia geométrica punto a punto existente entre la pantalla y la muestra (salvo en el caso de la derivación de la señal donde se producen ciertas distorsiones de escasa magnitud, que ya se han comentado). En la modulación en Y se pierde esta correspondencia, por lo que las imágenes resultantes no pueden ser empleadas en análisis cuantitativos. En este tratamiento, el pincel electrónico del tubo de rayos catódicos describe en cada barrido m una línea curva con brillo constante. Así, la abscisa, x , de cada punto conserva la correspondencia geométrica con la muestra, mientras que la ordenada, y , es proporcional mediante un factor K , al valor que toma la función S_m (ver derivación de la señal) en cada punto x de la línea de barrido m . La imagen que se obtiene mediante la modulación en Y, posee una gran espectacularidad al conferir cierto carácter tridimensional a la imagen, que se acentúa conforme aumenta el factor K , cuyo valor puede ser variado manualmente.

Este tratamiento sirve básicamente para resaltar pequeñas variaciones de contraste, y constituye una alternativa al proceso de derivación de la señal. La modulación en Y se aplica normalmente en el modo de topografía, con el fin de acentuar el relieve de aquellas muestras que lo tengan poco pronunciado. Cuando este tratamiento se aplica en otros modos, como por ejemplo de composición en probetas planas, pueden producirse errores de interpretación, debido a que la imagen final da una sensación de relieve que es falsa desde el punto de vista topográfico.

13.7. Combinación de tratamientos

Los tratamientos de señales que generalmente poseen los MEB suelen ser variantes o combinación de los ya descritos. A su vez, los tratamientos que lleva incorporados cada microscopio pueden mezclarse entre sí, con el fin de obtener el contraste deseado. De esta forma, una misma señal puede dar lugar a una gran variedad de imágenes finales. Seguidamente se expondrán consideraciones relativas a algunas de las combinaciones de tratamientos comúnmente utilizadas:

- La amplificación diferencial es el tratamiento que siempre es preciso realizar para, sumado con cualquier otro, conseguir el contraste y brillo ajustados al intervalo dinámico de la pantalla y de la película fotográfica utilizada.

- Existen algunos MEB en los que la amplificación no lineal (gamma), se efectúa sobre los dos extremos del intervalo dinámico a la vez, consiguiéndose de esta forma distribuir los niveles de gris de una manera más uniforme.

- Un recurso muy utilizado en los MEB que disponen de microanálisis, consiste en superponer a la imagen topográfica normal una línea de barrido modulada en Y por la intensidad de un pico característico de rayos-X procedente del espectrómetro, y conocer así la distribución elemental a lo largo de dicha línea.